

Abstract

Impulse drying technology is envisaged as a promising dewatering technique that combines the effect of mechanical pressure and intense heat, applied to paper in the press section of a paper machine, over a very short period of time. The combined action of such extreme operating conditions is expected to increase the dewatering rate, density and smoothness of paper along with a few other properties that are crucial in order to improve paper quality and performance according to its end use. Despite its potential benefits, the implementation of an impulse drying unit in the press section of a paper machine is regarded with caution. In fact, its industrial acceptance has been delayed by some difficulties in controlling the physical properties of the paper web under such intense conditions. Delamination has been pointed out as the main obstacle to the commercialization of impulse drying technology.

Understanding the mechanisms of heat and mass transfer along with the rheological behavior of paper within the impulse unit has been a matter of exhaustive study over the last three decades. Insight into the consolidation mechanism of paper using this high-intensity process is fundamental and may be gained by modeling and simulation of the transport phenomena involved in such process.

Transport phenomena inside paper are a complex subject because the cellulose fiber network does not remain inert during the drying/pressing process. For instance, water and water vapor interact with fibers; absorption of water in fibers leads to swelling that changes the porous structure of the fibrous network; water also influences the thermal conductivity and other physical properties of paper; and permeability, seen as an important factor controlling the development of internal vapor, is another relevant property that greatly depends on the structure of the porous material under study. One central issue in any investigation of the dewatering process by impulse drying is also the stress-strain behavior of the material.

The focus of this work is, therefore, on developing a mathematical description of the stress-strain behavior of the material taking into account the heat and mass transfer phenomena that may occur under specific operating conditions. The first part of this investigation was dedicated to setting up a laboratory platen press in order to simulate an impulse drying event allowing to acquire temperature, pressure and displacement experimental data. These results are fundamental to

the validation of the theoretical models developed in the present study.

The mathematical model presented here describes the simultaneous heat and mass transfer during the consolidation of paper and its supporting material, *i.e.* the felt. The role of multiphase flow in fibrous materials during high-intensity drying is of special interest, as liquid flow and steam formation are fundamental issues that need to be considered in the study of almost every paper grade. In addition, both paper and felt are considered to behave as viscoelastoplastic materials when submitted to a loading/deloading program. The stress-strain behavior is modeled according to the theory of cellular solids often used to describe the deformation and collapse of porous materials with an internal structure similar to that of honeycombs and foams.

The 3D unsteady-state global model was solved using a finite differences scheme for the spatial discretization of variables, and the resulting set of ODE's was solved using an integrator for *stiff* equations based on the Gear method. The model was used to predict the evolution of strain, elastic and viscous moduli, density, temperature, moisture ratio, pore saturation and gas pressure with time and at any given position in both paper and felt. It was concluded that the model can predict in an acceptable way the evolution of the key variables of the process and properties of the materials under study. However, given the complexity of the model, and the process itself, the numerical resolution of the resulting set of equations would most benefit from more advanced numerical and computational means.

Sumário

A tecnologia de secagem por impulso térmico é encarada como uma técnica promissora na remoção de água, que combina o efeito da pressão mecânica e do calor intenso aplicados durante um curto período de tempo ao papel na secção de prensagem de uma máquina de papel. A acção combinada de condições de operação tão extremas pressupõe o aumento da taxa de remoção de água, da densidade e da lisura do papel, bem como de outras propriedades cruciais à melhoria da qualidade e do desempenho do papel de acordo com o fim ao qual se destina. Apesar dos seus potenciais benefícios, a implementação de uma unidade de secagem por impulso térmico na secção de prensagem de uma máquina de papel é encarada com precaução. De facto, a sua aceitação a nível industrial tem sido retardada devido a dificuldades no controlo das propriedades físicas da folha de papel quando sujeita a tais condições extremas. A delaminação do papel tem sido referida como o principal obstáculo à comercialização da tecnologia de secagem por impulso térmico.

Compreender os mecanismos de transferência de massa e calor, assim como o comportamento reológico do papel no interior de uma unidade de impulso térmico, tem sido o alvo de um estudo exaustivo nas três últimas décadas. O conhecimento do mecanismo de consolidação da folha de papel por este processo intensivo é fundamental, e pode ser obtido pela modelização e simulação dos fenómenos de transporte envolvidos no processo.

Os fenómenos de transporte no interior da folha de papel são um assunto complexo uma vez que a rede de fibras de celulose não permanece inerte durante o processo de prensagem/secagem. Como exemplo, a água e o vapor de água interagem com as fibras; a absorção de água pelas fibras provoca o seu inchamento, alterando a estrutura porosa da rede fibrosa; a água também influencia a condutividade térmica e outras propriedades físicas do papel; e a permeabilidade, vista como um importante factor no controlo da formação de vapor no interior da folha, é também uma propriedade que depende fortemente da estrutura do material poroso em estudo. Uma questão central em qualquer investigação do processo de remoção de água por impulso térmico é, também, o comportamento do material à compressão.

O ponto central deste trabalho é, por isso, o desenvolvimento da descrição matemática da resposta em deformação do material à compressão, tendo em

conta os fenômenos de transferência de massa e calor que podem ocorrer sob determinadas condições de operação. A primeira parte deste trabalho de investigação foi dedicada à preparação de uma prensa laboratorial de pratos planos, com o intuito de simular a prensagem por impulso térmico, permitindo assim a recolha de dados experimentais de temperatura, pressão e deformação. Estes resultados são fundamentais para a validação dos modelos teóricos desenvolvidos no presente trabalho.

O modelo matemático aqui apresentado descreve a transferência simultânea de calor e massa no decorrer da consolidação da folha de papel e do material de suporte, *i.e.* o feltro. O papel do escoamento multifásico em materiais fibrosos durante a secagem a elevada temperatura e pressão reveste-se de especial importância, uma vez que o escoamento da fase líquida e a formação de vapor são questões fundamentais que deverão ser consideradas no estudo de quase todos os tipos de papel. Adicionalmente, assumiu-se que tanto o papel como o feltro se comportam como materiais viscoelastoplásticos quando submetidos a um programa de compressão/descompressão. A modelização da resposta em deformação do material à compressão é baseada na teoria dos sólidos celulares, várias vezes usada na descrição da deformação e colapso de materiais porosos com uma estrutura interna semelhante à de espumas e materiais com estrutura tipo “ninho de abelha”.

O modelo global 3D em estado não estacionário foi resolvido usando o método das diferenças finitas para a discretização espacial das variáveis, e o sistema de EDO's resultante foi resolvido usando um integrador para equações *stiff* baseado no método de Gear. O modelo foi usado para prever a evolução da deformação, módulo de elasticidade e parâmetro viscoso, densidade, temperatura, teor de humidade, saturação e pressão da fase gasosa com o tempo e em determinada posição do papel e do feltro. Concluiu-se que o modelo consegue prever, de forma aceitável, a evolução das principais variáveis do processo e das propriedades dos materiais em estudo. Contudo, dada a complexidade do modelo, e do próprio processo, o uso de métodos numéricos e computacionais mais avançados beneficiariam significativamente a resolução numérica do sistema de equações resultante.